

УДК 644.4

doi:10.20998/2413-4295.2018.09.02

## ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МИКРОВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

**И. Л. БОШКОВА, Н. В. ВОЛГУШЕВА**

*Кафедра теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей, Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, УКРАИНА  
\*email: boshkova.irina@gmail.com*

**АННОТАЦИЯ** Изучаются эффекты действия микроволнового электромагнитного поля на материалы растительного происхождения (семена, стебли травянистых растений). Показано, что в определенных режимах обработки наблюдается распушение целлюлозных волокон, что объясняется развитием больших градиентов давлений в материале. Приведены данные по оптимальным режимным параметрам для биостимуляции семян, стерилизации соломы при подготовке субстрата и экстрагированию веществ из некоторых видов растений. Проведена оценка энергетической эффективности методов микроволновой обработки на основе данных по КПД микроволновой камеры с загружаемым материалом. Определены условия достижения максимального КПД рабочей камеры при ее загрузке различными видами растительного материала.

**Ключевые слова:** микроволновое поле; растительная ткань; обработка; энергия; теплота; оптимальные параметры; коэффициент полезного действия

## STUDY OF EFFICIENCY OF MICROWAVE PROCESSING OF MATERIALS OF PLANT ORIGIN

**I. BOSHKOVA, N. VOLGUSHEVA**

*Odessa national academy of food technologies, Odessa, UKRAINE*

**ABSTRACT** The results of the investigation of the action of the microwave electromagnetic field on materials of plant origin for the purpose of determining optimal processing conditions in various technologies (seed biostimulation, heat treatment of a straw substratum, extraction of biologically active substances) are presented. The method of achieving this goal is a generalization of the calculated values for the heat of conversion of the microwave field energy when processing materials of different nature, with different moisture content and varying the loading of the microwave chamber. It is claimed that in order to obtain the effect of biostimulation, it is required to withstand the regime parameters at a level that does not allow the rupture of the cell walls, while in the preparation of the substrate this effect is preferable. When extracting biologically active substances (BAS), the development of pressure gradients in plant tissue helps to speed up the process, however, for every particular type of BAS, it is necessary to withstand the level of temperatures that can not damage the final product. The data on the optimal conditions for the microwave effect on a specific plant material for various technologies are obtained in the form of parameters such as the specific heat flux, the heating rate, and the processing time is obtained. is presented. On the basis of the calculations, the curves of the efficiency of the chamber on the mass of the material being loaded are obtained. Analysis of the curves led to the conclusion that when processing the plant materials under study, the ratio of the volume of the chamber to the volume of the material should be no less than ten. The maximum value of efficiency is achieved for the material, which is humidified according to technological conditions.

**Keywords:** microwave field; plant tissue; processing; energy; heat; optimal parameters; efficiency.

### Введение

Нагрев в микроволновом электромагнитном поле материалов, содержащих полярные молекулы (такие как вода, спирты, жирные кислоты, белки) давно зарекомендовал себя как эффективный метод обработки, применение которого находят в различных областях техники. Однако развитие новых технологий микроволновой обработки чаще всего начинается с попыток замены традиционных источников тепла в существующих технологиях на источники микроволнового нагрева. Такая замена будет экономически выгодной в том случае, если она сопровождается комплексными исследованиями,

направленными на определение рациональных режимов. Новая микроволновая технология может оказаться конкурентоспособной, если позволяет получить конечный продукт, существенно превосходящий по своим свойствам получаемый при помощи традиционной технологии. Развитие различных применений микроволновой обработки обусловлено принципиальными физическими отличиями процессов и результатов от соответствующих традиционных технологий [1, 2].

Термообработка материалов растительного происхождения является определяющей для большинства технологических процессов, в частности, сушки, экстрагирования и биостимуляции.

Несмотря на свое разнообразие, растительные материалы имеют общую специфику, которая состоит в строении растительных клеток, анизотропии и наличия веществ со свойствами полярных диэлектриков. Энергетический кризис и увеличение спроса на продукцию улучшенного качества вызвали необходимость совершенствования традиционных технологий и развития новых. В этом направлении методы с использованием энергии микроволнового электромагнитного поля (МВ ЭМП) диэлектрических материалов давно зарекомендовали себя как высокоэффективные, применение которых признано целесообразным для модернизации ряда технологических схем производства и обработки материалов.

Как было установлено [3, 4], эффективность применения каждого из рассматриваемых методов связана с изменением структуры растительного материала в ходе МВ обработки. Если в методе биостимуляции семян одной из задач являлось исключение режимов, нарушающих целостность клеточных стенок [5], то при подготовке субстрата на основе соломы разрушение растительной структуры является желательным. Исследования [6] показали, что поверхность исходного соломистого материала представляет собой гладкую и относительно однородную поверхность по высоте, в то время как поверхность обработанного образца отличается существенной шероховатостью. Полученные результаты свидетельствуют о расширении капилляров вследствие микровзрывов.

В настоящее время созданы основы для практического применения в сельском хозяйстве микроволновой предпосевной технологии обработки семян [2, 3]. Оценка влияния времени микроволновой экспозиции на стимуляцию всхожести [7] демонстрирует наличие оптимума, при 10 с обработки всхожесть достигла максимума. Однако не отмечаются удельные затраты энергии (на килограмм семян) с учетом коэффициента полезного действия камеры. Было однозначно определено, что влияние обработки в МВ поле проявляется существенней на семенах с изначально невысокой всхожестью, чем на семенах, лабораторная всхожесть которых составляла выше 95 %. Воздействие микроволн значительно увеличило энергии прорастания и прорастания у 8-летних семян моркови [8]. Максимальное прорастание семян моркови было установлено на частоте 9,3 ГГц при воздействии до 5 мин. Действие микроволнового электромагнитного поля на семена способно привести к существенному биостимулирующему эффекту, который проявляется на всех этапах вегетации растений [9, 10]. Проявление биостимуляции заключается в увеличении энергии всхожести, энергии прорастания, а при росте растений из обработанных семян – в усилении корневой системы, сокращении фаз вегетации. Этот эффект наблюдали как при обработке семян, так и при обработке клубней картофеля [11]. При экспозиции до 20 мин.

на частотах 38 ГГц, 46 ГГц и 54 ГГц исследователи не наблюдали влияния микроволнового излучения на вес урожая картофеля клубней Felka Bona. Излучение на частоте 2,45 ГГц длительностью 10 с и мощностью микроволнового генератора 100 Вт, вызвали наибольший рост биомассы в семенных картофельных зародышах и увеличение веса клубней Felka Bona. В экспериментах [12] наблюдалось существенное увеличение биомассы (до 66 %) с увеличением времени экспозиции от 12 минут до 20 минут по сравнению с контролем. В некоторых случаях биостимуляция проходит одновременно с дезинфекцией [9, 12]. Обработка семян МВ ЭМП является экологически чистым и эффективным методом [13]. Однако нет однозначных данных по режимам обработки различных семян в микроволновом поле, что не дает возможность с достаточной точностью прогнозировать результат. Это снижает эффективность применения метода.

Недостаточная полнота исследований по каждому из процессов не позволяет прогнозировать эффекты, возникающие в материале, и оценить энергетическую эффективность их применения.

### Цель работы

Оценка условий получения оптимального по энергетическим параметрам эффекта микроволнового воздействия в различных приложениях микроволновой обработки растительных материалов (обеззараживании с целью получения субстрата для дереворазрушающих грибов, биостимуляции семян и экстрагирования биологически активных веществ).

### Изложение основного материала

Исследования особенностей взаимодействия микроволнового электромагнитного поля с растительными материалами с целью разработки ряда новых интенсивных и энергетически эффективных технологий, к которым относятся предпосевная обработка семян (биостимуляция семян), подготовка растительного субстрата для производства дереворазрушающих грибов и экстрагирование биологически активных веществ, привели к выводу о необходимости установления области режимных параметров обработки, подготовки сырья и условий его загрузки. Несмотря на существенные различия в конечных целях обработки для указанных методов, их объединяет то, что в процессе преобразования МВ энергии во внутреннюю энергию тела основная ее часть идет на нагрев материала и пренебрежимо мало – на испарение воды. Основное, что отличает обрабатываемые растительные материалы в указанных методиках – существенное различие во влагосодержании. Так, при предпосевной обработке семян влагосодержание соответствовало равновесному, при подготовке субстрата – уровню влажности 73%, при процессах экстрагирования

влагосодержание стремилось к 100%. Соответственно, различные цели микроволновой обработки определили ряд специфических задач для каждого из разрабатываемых методов.

Особенности каждого из рассматриваемого метода связаны с изменением структуры растительного материала в ходе МВ обработки. Но если при развитии метода биостимуляции семян одной из задач являлось исключение режимов, нарушающих целостность клеточных стенок, что приводит к гибели семян или к угнетению роста растений, то при подготовке растительного субстрата и при экстрагировании разрушение растительной структуры является желательным.

В результате исследования эффектов влияния микроволнового электромагнитного поля на семена была предложена гипотеза [5], согласно которой причиной возникновения эффекта биостимуляции можно считать улучшение транспортных свойств проводящей системы растительной ткани вследствие развития высоких градиентов давления в замкнутых микрообъемах микрофибрилл клеточных стенок и пор, заполненных средой, способной поглощать микроволновую энергию.

Следующая перспективная технология, включающая метод микроволновой обработки растительного материала, относится к культивированию дереворазрушающих грибов, таких как вешенка и шиитаке. На сегодняшний день съедобные грибы относятся к ценным продуктам питания людей благодаря большому содержанию белков, балластных веществ, некоторых витаминов (РР, С и группы В), низкому содержанию жиров и низкой калорийности. В полной технологической схеме культивирования грибов наиболее сложным и энергоемким процессом является процесс приготовления растительного субстрата. Традиционные виды термообработки для стерилизации и пастеризации длительны и требуют больших затрат энергии. Кроме того, существует проблема неоднородности нагрева из-за неравномерности загрузки камеры материалом, а сами пастеризационные или стерилизационные установки отличаются высокой стоимостью. Нарушение технологического процесса при подготовке субстрата приводит к ухудшению его качества в результате обеднения питательными веществами и насыщения патогенными токсинами, что приводит к поражению мицелия и плодовых тел фитопатогенами. Так, в разных субстратах (кукуруза, пшеница, овес, отруби, жмыхи и др.) доля токсигенных грибов, например, продуцирующих афлатоксины, составляет от 2,8 до 94,3%. Это, в свою очередь, ведет к чрезмерному использованию антисептиков и фунгицидов для защиты культивируемых грибов, что значительно ухудшает не только экономические показатели при промышленном выращивании грибов, но и качество продукта. В отличие от традиционных способов термической обработки субстрата для выращивания

вешенки, применение микроволновой технологии имеет ряд существенных преимуществ. К ним относится:

- высокая скорость повышения температуры в субстрате;
- одновременный объемный и равномерный нагрев всего субстрата, находящегося в зоне рабочей камеры МВ установки;
- высокая стерильность процесса обработки субстрата, более комфортные условия труда;
- существенное сокращение длительности обработки субстрата в рабочей камере (до 5-8 минут).
- снижение инфицированности субстрата за счет специфического характера влияния МВ поля на конкурентную микрофлору.

Термообработка с использованием микроволнового метода в режимах, улучшающих питательные для мицелия свойства соломы, объясняется изменением структуры материала. На рис. 1 представлены модели, полученные на основе атомно-силового метода зондовой микроскопии [6]. Для получения данных использовался сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) NanoEducator, который позволяет анализировать материал с нанометровым уровнем пространственного разрешения.

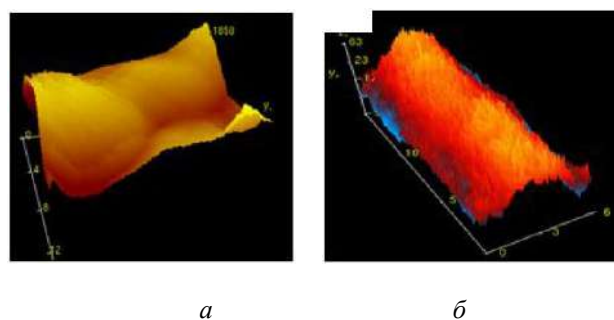


Рис. 1 – Поверхность соломиного материала размером 23х23 мкм [6]:

*а – исходный материал; б – обработанный в МВ поле*

Видно, что поверхность исходного соломиного материала представляет собой гладкую и относительно однородную поверхность по высоте, в то время как поверхность обработанного образца отличается существенной шероховатостью. Полученные результаты свидетельствуют о распушении целлюлозы вследствие микровзрывов. Представляется, что для получения эффекта биостимуляции требуется выдерживать режимные параметры на уровне, не допускающим разрывов клеточных стенок [5], в то время как при подготовке субстрата этот эффект нужно достичь. При экстрагировании биологически активных веществ (БАВ) развитие градиентов давления в растительной ткани способствует ускорению процесса, однако при этом для каждого конкретного вида БАВ необходимо выдерживать тот уровень температур, который не способен повредить конечному продукту. Поэтому

предварительно перед оценкой энергетической эффективности микроволновых технологий необходимы данные по оптимальным условиям микроволнового воздействия на конкретный растительный материал. Эти данные могут быть представлены в виде таких параметров, как удельный тепловой поток  $q_v$ , темп нагрева  $\frac{\Delta t}{\tau}$  и длительность обработки  $\tau$ .

Для оценки энергетической эффективности применения микроволновых технологий производились расчеты теплоты, возникающей от преобразования микроволновой энергии растительным материалом. В настоящее время методы оценки энергоэффективности отличаются разнообразием, они могут включать такие характеристики, как теплофизические свойства, качество энергии, производительность и пр., однако при всем многообразии подходов, определяемых спецификой конкретных разработок, универсальным критерием оценки эффективности тепловых процессов является коэффициент полезного действия КПД, определение которого является отправной точкой в исследованиях, проводимых с целью оптимизации теплопереноса.

КПД камеры определялось как отношение теплоты, включающей в себя значение полезного теплового потока  $Q_{\text{пол}}$ , потери в окружающую среду (в объем рабочей камеры) в результате естественной конвекции  $Q_{\text{конв}}$  и лучистого теплообмена между образцом и стенками камеры ( $Q_{\Sigma} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{конв}} + Q_{\text{луч}}$ ), к выходной мощности магнетрона:

$$\eta_k = \frac{Q_{\Sigma}}{P_{\text{вых}}} \quad (1)$$

Полезный тепловой поток определяется по результатам измерений температуры материала в начале и конце обработки:

$$Q_{\text{пол}} = \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta t}{\tau}, \text{ Вт.} \quad (2)$$

где  $m$  - масса материала,  $\tau$  - длительность МВ воздействия.

Для расчета теплоты, образованной в материале при взаимодействии с микроволновым полем, предлагается применять следующую зависимость:

$$q = \frac{P_{\text{вых}} \cdot \eta_k}{V}, \text{ Вт/м}^3, \quad (3)$$

где  $V$  - объем, занимаемый материалом.

Для получения значений  $\eta_k$  необходимы эмпирические зависимости, соответствующие конкретному виду обрабатываемого материала.

## Обсуждение результатов

Для микроволновой технологии подготовки субстрата эффективность МВ воздействия оценивалась по количеству выросших грибов (вешенка). Получен оптимальный режим обработки, для которого экспозиция составляет 140 с при массе загрузки 0,4 кг влажностью 74 %. Для этого режима КПД камеры составлял 80%.

Микроволновые технологии экстрагирования биологически активных веществ находятся в стадии разработки. В настоящее время массив данных по биологически активным веществам различных растений и их взаимодействию с вредными микроорганизмами и вредителями.

Энергетическая эффективность экстрагирования БАВ из ряда растительных материалов (в частности, хвои, шелухи лука, полыни, молочая прутьевидного) с применением энергии МВ поля выше в сравнении с традиционной технологией в 1,6 (хвоя) - 11 (шелуха лука) раз. Интенсивность извлечения биологически активных веществ увеличивается в 11 (шелуха лука) - 30 (молочай прутьевидный) раз в сравнении с традиционной технологией.

Оптимальные характеристики микроволновой обработки в различных технологиях, полученные по результатам экспериментальных исследований, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики микроволновой обработки в различных технологиях. I – биостимуляция, II – термообработка соломистого субстрата, III – экстрагирование.

	Цель микроволновой обработки					
	I			II	III	
	1	2	3	4	5	6
$q_v \cdot 10^{-5}$ , Вт/м <sup>3</sup>	7,5	4,2	6,7	7,8	7,2	6,3
$\frac{\Delta t}{\tau}$ , К/с	0,15	0,14	0,17	0,9	0,4	0,8
$\tau$ , с	90	110	50	140	150	180

Примечание: 1 – пшеница, 2 – подсолнечник, 3 – горох, 4 – солома влажная, 5 – чистотел, 6 – молюск дикий.

При расчете принималось, что насыпная плотность пшеницы – 780 кг/м<sup>3</sup>, семян подсолнечника – 440 кг/м<sup>3</sup>, гороха – 700 кг/м<sup>3</sup>. При термообработке соломы в течение 90 с температура повысилась на 80 °С и затем оставалась на уровне 100 °С, что учитывалось при расчете темпа нагрева. Аналогичная ситуация была при исследовании МВ экстрагирования: материал нагревался в течение 120 с. Дальнейшая выдержка материала под действием МВ поля, очевидно, способствовала выходу целевых компонентов, а в случае обработки соломы – накоплению структурных изменений в

материале. Обращает на себя внимание тот факт, что для всех исследуемых методов обработки значение удельной мощности одного порядка, однако эффекты стерилизации и улучшения питательных свойств (термообработка соломы) или экстрагирования БАВ требуют большего времени нахождения материала в МВ камере, чем при обработке семян с целью их стимуляции. Это подтверждает разработанную теорию, согласно которой полученные эффекты при экстрагировании связаны с разрывами в клеточных стенках и сосудистой системе, в то время как для достижения биостимуляции эти явления должны быть исключены и эффект достигается на начальной стадии расширения объемов жидкости, заключенных жесткими целлюлозными оболочками.

Различия в темпе нагрева в исследуемых методах связаны с диэлектрическими свойствами обрабатываемых материалов. При экстрагировании использовался свежеобраный материал с высоким влагосодержанием, также как и замоченная предварительно солома, что обеспечивало высокую интенсивность преобразования энергии микроволнового поля в тепловую.

При снижении удельной мощности достигаются требуемые эффекты путем увеличения длительности обработки. Во всех случаях эффективность обработки определялась также температурой материала.

На рис. 2 приведены кривые зависимости КПД рабочей (микроволновой) камеры от массы загружаемого материала. При проведении экспериментов использовалась микроволновая камера с внутренним объемом  $V_k=0,0198 \text{ м}^3$ .

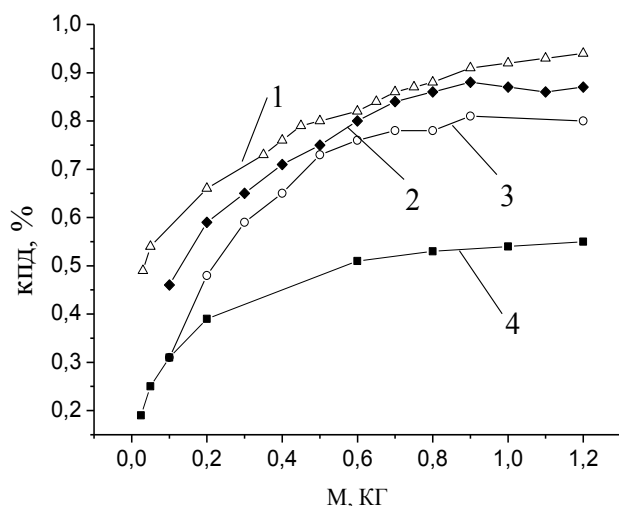


Рис. 2 – Влияние объема загрузки материала на КПД камеры

1 - вода, 2 - материал для экстрагирования БАВ (молокан дикий, залитый водой), 3 - увлажненная солома для подготовки грибного субстрата, 4 - семена пшеницы

Результаты исследования влияния вида материала и объема загрузки на КПД камеры показывают, что, чем выше влагосодержание, тем большего значения КПД можно достичь. Для семян с влагосодержанием не выше 12 % КПД не превышает 56 %. Максимальный КПД при обработке пшеницы наблюдался при соотношении объемов камеры к объему материала  $V_k/V_m=14,5$  и выше; при обработке стеблей молокана дикого, залитого водой -  $V_k/V_m=13,6$ ; и увлажненной соломы (влажность 75%) -  $V_k/V_m=9,6$ . Можно заключить, что для достижения максимального КПД рабочей камеры при обработке исследуемых растительных материалов соотношение объема камеры к объему загрузки должно быть не меньше 10. Равномерность обработки достигается в первую очередь выбором толщины слоя, который должен учитывать глубину проникновения электромагнитной энергии в материал. Эти рекомендации можно применять при конструировании микроволновых установок для обработки материалов растительного происхождения.

### Выводы

Интенсификация процессов переноса массы при применении микроволновых технологий нагрева непосредственно связана с изменениями в структуре растительной ткани, происходящими вследствие дифференцированности ее структуры.

Методы оценки теплового эффекта взаимодействия микроволнового электромагнитного поля с растительным материалом, примененные при определении КПД микроволновой камеры в зависимости от физических свойств материала и формирования слоя в объеме микроволновой камеры, позволяют с допустимой погрешностью определять эффективность преобразования энергии микроволнового поля.

Для повышения КПД рабочей (микроволновой) камеры необходимо обеспечить оптимальную загрузку, причем вид материала определяет максимальное значение этой величины. Снижение влагосодержания приводит к снижению КПД камеры.

Для достижения максимального КПД рабочей камеры при обработке исследуемых растительных материалов соотношение объема камеры к объему загрузки должно быть не меньше 10.

### Список литературы

1. Feng, H. J. Combined microwave and spouted bed drying of diced apples: effect of drying conditions on drying kinetics and product temperature / H. J. Feng, P. R. Tang, Cavalieri // *Drying Tech.* – 1999. – №. 17(10). – P. 1981-1998.
2. Microwave-assisted Extraction for Bioactive Compounds. Theory and Practice. Editors Farid Chemat Giancarlo Cravotto. Springer Science+Business Media New York 2013. – 248 p.

3. Li, Y. Intermittent microwave drying of wheat / Y. Li, T. Zhang, C. Wu, C. Zhang // *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*. – 2014. – Vol. 2, Issue 1. – P. 32–36.
4. Puligundla, P. Potentials of Microwave Heating Technology for Select Food Processing Applications – a Brief Overview and Update / P. Puligundla // *Journal of Food Processing & Technology*. – 2013. – Vol. 04, Issue 11. – P. 2–9. – doi: 10.4172/2157-7110.1000278.
5. Kalinin, L. G. Physical model of response of the plant tissue to a microwave electromagnetic field / L. G. Kalinin, I. L. Boshkova // *Biofizika*. – 2003. – Vol. 48, Issue 1. – P. 122–124.
6. Московский, М. Н. Структурный анализ поверхности соломы, обработанной СВЧ излучением / М. Н. Московский, Р. А. Фридрих, А. А. Гуляев // *Вестник ДГТУ*. – 2010. – Т. 10, № 5. – С. 648–654.
7. Jakubowski, T. Evaluation of the impact of pre-sowing microwave stimulation of bean seeds on the germination process / T. Jakubowski // *Agricultural Engineering*. – 2015. – Vol. 2, Issue 154. – P. 45–56.
8. Radzevičius, A. The effect of strong microwave electric field radiation on: (1) vegetable seed germination and seedling growth rate / A. Radzevičius, S. Sakalauskienė, M. Dagys, R. Simniškis, R. Karklelienė, Č. Bobinas, P. Duchovskis // *Zemdirbyste-Agriculture*. – 2013. – Vol. 100, Issue 2. – P. 179–184. – doi: 10.13080/z-a.2013.100.023.
9. Morozov, G. A. Microwave Technology for Treatment Seed / G. A. Morozov, V. I. Blokhin, N. E. Stakhova et. al. // *World Journal of Agricultural Research*. – 2013. – Vol. 1, Issue 3. – P. 39–43.
10. Ragha, L. Effects of Low-Power Microwave Fields on Seed Germination and Growth Rate / L. Ragha, S. Mishra, V. Ramachandran, M. S. Bhatia // *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. – 2011. – Vol. 03, Issue 05. – P. 165–171. – doi: 10.4236/jemaa.2011.35027.
11. Jakubowski, T. The impact of microwave radiation at different frequencies on weight of seed potato germs and crop of potato tubers / T. Jakubowski // *Agricultural Engineering*. – 2010. – Vol. 6, Issue 124. – P. 57–64.
12. Friesen, A. P. Effect of microwave radiation on dry bean seed infected with *Colletotrichum lindemuthianum* with and without the use of chemical seed treatment / A. P. Friesen, R. L. Conner, D. E. Robinson, W. R. Barton, C. L. Gillard // *Canadian Journal of Plant Science*. – 2014. – Vol. 94, Issue 8. – P. 1373–1384. – doi: 10.4141/cjps-2014-035.
13. Sharma, K. K. Seed treatments for sustainable agriculture – A review / K. K. Sharma, U. S. Singh, P. Sharma, A. Kumar, L. Sharma // *Journal of Applied and Natural Science*. – 2015. – Vol. 7, Issue 1. – P. 521–539.

## Bibliography (transliterated)

1. Feng, H. J., Tang P. R., Cavalieri Combined microwave and spouted bed drying of diced apples: effect of drying conditions on drying kinetics and product temperature. *Drying Tech*, 1999, **17**(10), 1981–1998.
2. Microwave-assisted Extraction for Bioactive Compounds. Theory and Practice. Editors Farid Chemat Giancarlo Cravotto. Springer Science+Business Media New York 2013, 248 p.
3. Li, Y., Zhang, T., Wu, C., Zhang, C. Intermittent microwave drying of wheat. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 2014, **2** (1), 32–36.
4. Puligundla, P. Potentials of Microwave Heating Technology for Select Food Processing Applications – a Brief Overview and Update. *Journal of Food Processing & Technology*, 2013, **04** (11), doi: 10.4172/2157-7110.1000278,
5. Kalinin, L. G., Boshkova, I. L. Physical model of response of the plant tissue to a microwave electromagnetic field. *Biofizika*, 2003, **48** (1), 122–124.
6. Moskovskiy, M. N., Fridrih, R. A., Gulyaev, A. A. Strukturnyy analiz poverhnosti solomy, obrabotannoy SVCh izlucheniem. *Vestnik DGTU*, 2010, **10** (5), 648–654.
7. Jakubowski, T. Evaluation of the impact of pre-sowing microwave stimulation of bean seeds on the germination process. *Agricultural Engineering*, 2015, **2** (154), 45–56.
8. Radzevičius, A., Sakalauskienė, S., Dagys, M., Simniškis, R., Karklelienė, R., Bobinas, Č., Duchovskis, P. The effect of strong microwave electric field radiation on: (1) vegetable seed germination and seedling growth rate. *Zemdirbyste-Agriculture*, 2013, **100** (2), 179–184, doi: 10.13080/z-a.2013.100.023,
9. Morozov, G. A., Blokhin, V. I., Stakhova, N. E. et. al. Microwave Technology for Treatment Seed. *World Journal of Agricultural Research*, 2013, **1** (3), 39–43.
10. Ragha, L., Mishra, S., Ramachandran, V., Bhatia, M. S. Effects of Low-Power Microwave Fields on Seed Germination and Growth Rate. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 2011, **03** (05), 165–171, doi: 10.4236/jemaa.2011.35027,
11. Jakubowski, T. The impact of microwave radiation at different frequencies on weight of seed potato germs and crop of potato tubers. *Agricultural Engineering*, 2010, **6** (124), 57–64.
12. Friesen, A. P., Conner, R. L., Robinson, D. E., Barton, W. R., Gillard, C. L. Effect of microwave radiation on dry bean seed infected with *Colletotrichum lindemuthianum* with and without the use of chemical seed treatment. *Canadian Journal of Plant Science*, 2014, **94** (8), 1373–1384, doi: 10.4141/cjps-2014-035.
13. Sharma, K. K., Singh, U. S., Sharma, P., Kumar, A., Sharma, L. Seed treatments for sustainable agriculture – A review. *Journal of Applied and Natural Science*, 2015, **7** (1), 521–539.

## Сведения об авторах (About authors)

**Бошкова Ирина Леонидовна** – доктор технических наук, профессор, Одесская национальная академия пищевых технологий, профессор кафедры теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей, г. Одесса, Украина; e-mail: boshkova.irina@gmail.com.

**Irina Boshkova** – Doctor of technical sciences, Professor, The department of Heat-and-Power Engineering and Fuel Pipeline Transportation, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine, e-mail: boshkova.irina@gmail.com.

**Волгушева Наталья Викторовна** – кандидат технических наук, Одесская национальная академия пищевых технологий, доцент кафедры теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей, г. Одесса, Украина; e-mail: natvolgusheva@gmail.com.

**Natalya Volgusheva** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, The department of Heat-and-Power Engineering and Fuel Pipeline Transportation, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine, e-mail: natvolgusheva@gmail.com.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Бошкова, И. Л.** Изучение эффективности микроволновой обработки материалов растительного происхождения / **И. Л. Бошкова, Н. В. Волгушева** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 15-21. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.02.

*Please cite this article as:*

**Boshkova, I., Volgusheva, N.** Study of efficiency of microwave processing of materials of plant origin. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 9 (1285), 15–21, doi:10.20998/2413-4295.2018.09.02.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Бошкова, І. Л.** Вивчення ефективності мікрохвильової обробки матеріалів рослинного походження / **І. Л. Бошкова, Н. В. Волгушева** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018 – № 9 (1285). – С. 15-21. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.02.

**АНОТАЦІЯ** Вивчаються ефекти дії мікрохвильового електромагнітного поля на матеріали рослинного походження (насіння, стебла трав'янистих рослин). Показано, що в певних режимах обробки спостерігається розпушення целюлозних волокон, що пояснюється розвитком великих градієнтів тисків в матеріалі. Наведено дані по оптимальних режимних параметрах для біостимуляції насіння, стерилізації соломи при підготовці субстрату і екстрагування речовин з деяких видів рослин. Проведено оцінку енергетичної ефективності методів мікрохвильової обробки на основі даних по ККД мікрохвильовій камері з завантаженням матеріалом. Визначено умови досягнення максимального ККД робочої камери при її завантаженні різними видами рослинного матеріалу.

**Ключові слова:** мікрохвильове поле; рослинна тканина; обробка; енергія; теплота; оптимальні параметри; коефіцієнт корисної дії

*Поступила (received) 08.03.2018*